

STATUS OF SCSS X-FEL PROJECT AT RIKEN/SPRING-8

Tsumoru Shintake^{1,A)}, Yuji Otake^{A)}, Kazuaki Togawa^{A)}, Takahiro Inagaki^{A)}, Takashi Tanaka^{A)}, Toru Hara^{A)}, Hideo Kitamura^{A)}, Makina Yabashi^{A)}, Kenji Tamasaku^{A)}, Tetsuya Ishikawa^{A)}, Hitohi Baba^{A)}, Kazuyuki Onoe^{A)}, Koujiro Kase^{A)}, Satoru Kojima^{A)}, Sekiguchi Yoshihiro^{A)}, Rieko Tsuru^{A)}, Katsutoshi Shirasawa^{A)}, Shigefumi Eguchi^{A)}, Teruhiko Bizen^{B)}, Takamitsu Seike^{B)}, Marechal Xavier^{B)}, Yoshitaka Kawashima^{B)}, Takeo Takashima^{B)}, Sakuo Matsui^{B)}, Zhang Chao^{B)}, Hiroyasu Ego^{B)}, Sunao Takahashi^{B)}, Tougo Kudo^{B)}, Toru Fukui^{B)}, Toru Ohata^{B)}, Ryotaro Tanaka^{B)}, Shinobu Inoue^{B)}, Yoshihiro Asano^{B)}, Tetsuya Takagi^{B)}, Shunji Goto^{B)}, Hiroaki Kimura^{B)}, Shukui Wu^{B)}, Noritaka Kumagai^{B)}, Hiroshi Matsumoto^{C)}, Nisiyama, Shusuke^{D)},

^{A)}RIKEN Harima Institute, SPring-8, Koto, Hyogo, 679-5148, Japan

^{B)}JASRI SPring-8, Koto, Hyogo, 679-5198, Japan

^{C)}KEK, Tsukuba, 305-0801, Japan

^{D)}Hokkaido University, Sapporo, 060-8628, Japan

Abstract

R&D for X-ray FEL started in 2001 at RIKEN Harima Institute aiming at generating intense coherent laser at X-ray wavelength before year of 2010. The project named SCSS: SPring-8 Compact SASE Source, whose machine scale is much smaller than the other similar project in US and Europe. Keys are the short period undulator, high gradient C-band accelerator and the low emittance electron gun. To confirm the concept, a test accelerator is under construction at SPring-8 site, whose beam energy is 250 MeV and target wavelength is 60 nm. We report the present status of test accelerator, and design work on 8 GeV X-FEL machine.

理研SCSS X線FEL計画の現状

1. はじめに

理研播磨研究所では2001年より将来大きな発展が期待されるSASE-FELの技術開発プロジェクトSCSS:SPring-8 Compact SASE Sourceをスタートした。その第1期としてビームエネルギーが250MeV、最短波長 60 nmの軟X線領域のSCSS試験加速器を2005年11月のビーム運転を目指し勢力的に建設中である。SCSSの技術開発の現況、ならびに、本格的X線FELへ向けての技術開発等につき述べる。

将来、オングストローム領域のX線自由電子レーザー (XFEL)を実現するために、まず軟X線でのFELを実証すべく、理研・播磨研究所ではSCSS計画を実施している。SCSSの特徴である「コンパクトなFEL」を実現するために、Cバンド高電界加速器、短周期の真空封止アンジュレータ、そして電子銃には単結晶CeB6カソードを採用し、その技術開発を行っている。また将来のユーザー利用を考慮して「ビームの安定性」を最重要課題に取り上げ、技術開発を行っている。

SCSS^[1]とはSPring-8 Compact SASE Sourceの頭文字をとったものであり、

(1) 低エミッタンス電子銃

(2) 高電界Cバンド加速器技術

(3) 短波長の真空封止型アンジュレータ

の3つの技術によって、全長800m以内の装置にて波長0.1 nmのX線FELを実現するものである。これは、諸外国の同種のプロジェクトに比べて格段に短いため、プロジェクトの特徴として“Compact”を強調している。いわゆるSASE型の自由電子レーザーではノイズレベルのX線パワーを、極めて長いアンジュレータによってGWレベルの強力なX線パワーに増幅するため、装置が長大になり、これに伴って建設コストもはねあがる。また供給できるビームラインも10本以内にとどまるため、コストパフォーマンスが極めて低いマシンとなる。この問題を解決し、将来より広くFELを利用できるようにするために、装置のコンパクト化を行っているのである。

2. 技術開発の概要

SCSSでは、広く実用に供するために「ビームの安定性」を最重要課題に取り上げ、各要素の開発を行っている。すなわち、

(1) 電子源の安定化：低エミッタンス電子銃のカソードに、電子顕微鏡のカソードに使用されて

¹ E-mail: shintake@spring8.or.jp

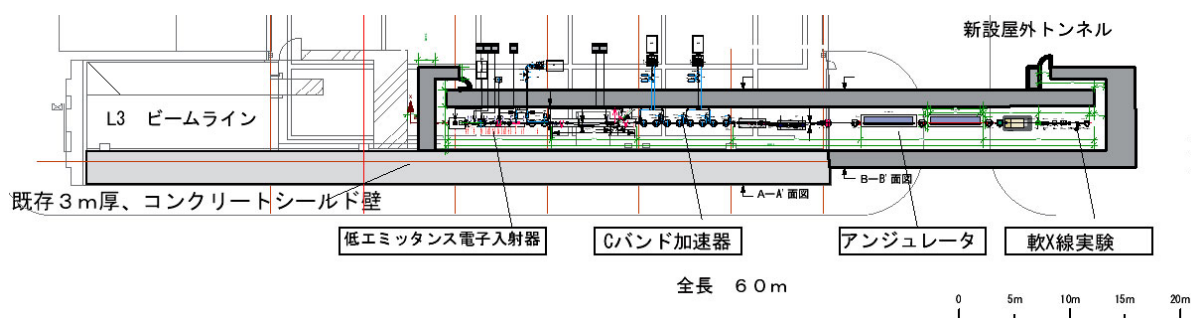


図1 SCSS試験加速器。ビームエネルギー250 MeVにて波長60nmの発振を目指す。

いる単結晶CeB6を用いた熱電子銃を採用しており、長寿命(数万時間)が実現可能。さらに、これに用いる高電圧電源の安定化、カソード温度のフィードバック等により、ビーム電流の安定化(変動 1×10^{-3} 以内)が期待できる。

(2) 高品質電子ビーム：電子銃の加速電圧を500 kVとし、相対論の効果により空間電荷によるビームの発散をおさえ、エミッタンスが小さく(2 π -mm-mrad以下)、かつハローの極めて少ないクリーンな電子ビームを発生する入射方式を採用。

(3) 加速エネルギーの安定化：クライストロン電源にインバータ方式の高電圧電源を採用し、その安定制御技術を開発中である。現在 2×10^{-3} の安定度が得られているが、さらに一桁以上の改善をめざし、回路技術を検討中。これにより近い将来は 1×10^{-4} の波長安定度が保証できるだろう。

(4) 電子軌道の高精度制御：分解能100nm以下の空洞型ビーム位置モニターがリニアコライダー研究ですでに開発済みであり、これをアンジュレータ間のビーム位置制御に応用する。また、このビーム位置モニターを設置する架台として、熱膨張の極めて小さい(1×10^{-6})セラミック(コージライト)を使用した架台を開発中である。

(5) 加速器を収納する加速器建屋を、日照等による影響を出来るだけ押さえるべく、建物の向き、壁の構造、機器の配置など詳細な検討を行っている。

3. 試験加速器

上記の開発によって得られた成果を、一通り加速器に組み込み、性能試験を実施するために、ビームエネルギーが250 MeVという、約30分の1スケール

の試験加速器を、Spring-8敷地内の組立て調整棟に建設中である。図1にその平面図を示す。Sバンド2本、Cバンド4本の加速管にて、ビームエネルギー250 MeVを得、周期長15 mm、長さ4.5 mアンジュレータ2台にて、波長60 nmの軟X線にてSASE-FEL発振の試験を行う。この試験の目的は、

- (1) SASE-FELの理解と、問題点の洗い出し。
- (2) Seeding試験
- (3) ハードウェアの運転試験
- (4) ビーム運転のための制御ソフトの整備。
- (5) 短バンチ電子ビームの物理
- (6) 軟X線レーザーを使った応用試験
- (7) THz放射の物理、応用試験
- (8) 8 GeV規模のX線FELへ向けた、工期とコストの評価

などである。本年11月の完成を目指して、急ピッチでトンネルの土木工事(図2)、機器製造、ソフト整備、放射線申請を行っている。

4. X線FEL計画

コヒーレントなX線が得られた場合に、オングストローム分解能の回折イメージングに最も大きな期待がかかるが、これを広く応用するには、どうしてもX線の波長を1オングストローム以下に持っていかななくてはならない。アンジュレータの実用的なギャップ限界が、おそらく、数ミリメートルであろうから、真空封止アンジュレータを仮定しても(周期長15 mm)、電子ビームのエネルギーは6 ~ 8 GeVとなり、かなり大掛かりな加速器となる。

Cバンド加速器の加速電界を32 MV/mと仮定して、Spring-8内の敷地に展開すると、図4のように1 kmビームラインにそった、約700mの施設に収まりそうである。ここで、アンジュレータは、全長80 mとし、十分にFELが飽和する長さを確保した。また、アンジュレータを設置する場所を、地山であった場所とし、岩盤に直接に建物の基礎を載せることとした。これによって、最も安定性が要求されるアンジュレータを、長期にわたり、まっすぐに保持することが可能となる。

図面上には、アンジュレータラインが4本描か



図2 組立調整棟、SCSS試験加速器建設(2005/05)

		SCSS Test	X-ray FEL	
Beam Energy	E	0.25	6.0	GeV
X-ray Wavelength	λ	60	0.1	nm
Beam Emittance	ϵ_n	2	0.85	$\pi\text{mm.mrad}$
Bunch Length	Δz FWHM	150 0.5	75 0.25	μm psec
Transverse Beam Size	$\sigma_{x,y}$	100	25	μm
Peak Current	I_p	0.5	3	kA
Charge per bunch	q	0.3	0.8	nC
Undulator Parameter	λ_u K	15 1.3	15 1.3	mm
Length	L	10	80	m
FEL Saturation Length	L_{sat}	20	75	m

図3 電子ビームパラメータ

れているが、当所は1本からスタートし、問題点を洗い出したのちに、ユーザーからの要求も組み入れて、増設してゆく。

マシンパラメータに見るように、電子のバンチ長がフェムト秒の領域となっており、短いアンジュレータからの放射光も、時間分解の解析に十分に利用可能である。

5. 技術的課題

従来の放射光施設では、線型加速器の電子ビームをリング型のシンクロトロンへ蓄積して、これから放射光を取り出していたため、線型加速器に特有のジッタが、ユーザーのX線ビームラインに届かないというメリットがあった。しかし、このX線FELでは線型加速器のビームを直接ユーザービームとするため、非常に問題が多い。すなわち、

- (1) 線型加速器は未だ不安定。とくに低エネルギー部分が不安定。
- (2) 加速管から発生する暗電流が多い。これ

が、BPMエラーを発生し、またアンジュレータ磁石の減磁の危険をうむ。

- (3) 部品の寿命が短い（頻繁なメンテナンスが必要）

しかり勢力的なR&Dによって、これらの問題は、必ずや解決でき、新しいカテゴリの解析ツールとなり、広い科学分野に貢献できると思われる。

加速器に携わっておられる諸兄のご協力を仰ぐ次第です。

参考文献

- [1] SCSSプロジェクト関連資料は、
<http://www-xfel.spring8.or.jp>
- [2] 稲垣 隆宏、他、「Cバンド加速管の高電界試験」、本研究会
- [3] 松本 浩、他、「50 kV/30 kWインバーター電源の運転経験」、本研究会
- [4] 新竹 積、他、「高安定ソリッドステート高周波アンプの開発」、本研究会
- [5] 新竹 積、他、「床面研削装置の開発」、本研究会
- [6] 大竹雄二、他、「コージライト製安定架台の開発：振動測定について」、本研究会
- [7] 渡川和晃、他、「重量物の精密位置決め用エアパッド開発」、本研究会
- [8] 木村洋昭、他、「ミリメートル精度のコンクリート床面のレベル調整」、本研究会
- [9] 柱野竜臣、他、「SASE-FEL用238MHz空洞の開発」、本研究会
- [10] 西山修輔、他、「粗い金属表面におけるOTRの発光特性」、本研究会

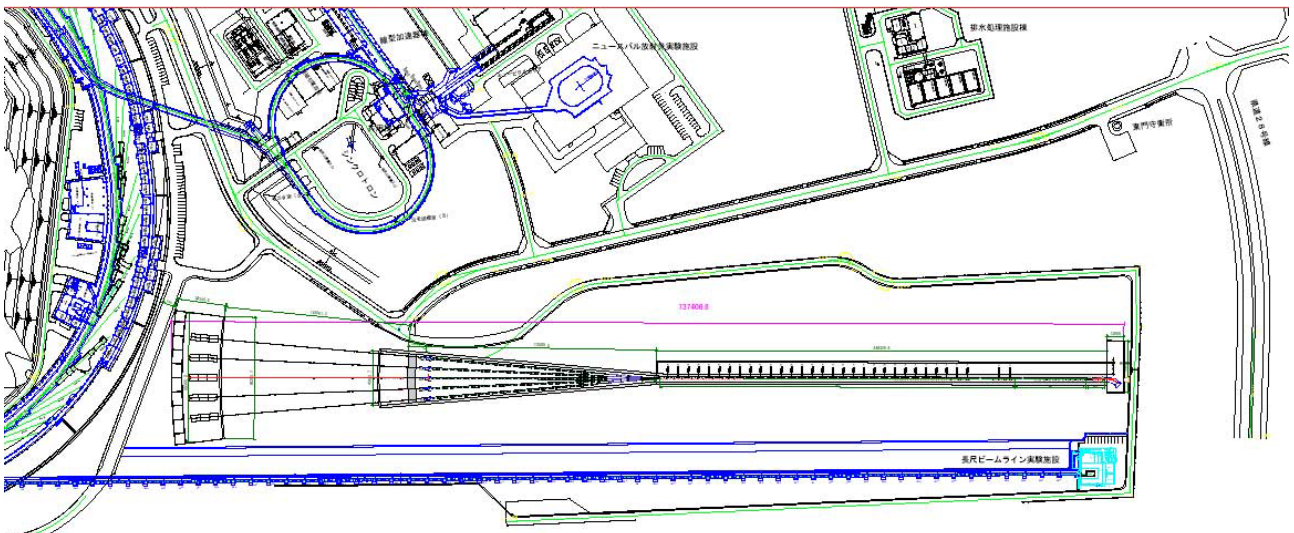


図4 8 GeV X-FEL project at RIKEN/SPring-8